第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子

文妙霞， 何学高， 刘 欢， 张 婧， 罗 晨，
贾丰铭， 王义贵， 胡云云

（国家林业和草原局西北调查规划院，旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室，陕西 西安 710048）

摘 要：以2000—2019年SPOT/VEGETATION的NDVI时间序列数据集为数据源，采用年均值法、Theil-Sen Median倾斜度分析和Mann-Kendall检验方法，研究宁夏草地植被覆被的时空分布及变化特征，利用Hurst指数方法分析草地植被覆被的可持续性特征和未来发展趋势。同时，基于地理探测器量化了平均降水量、海拔、地区生产总值（GDP）等13个因子对其时空分布的影响。结果表明：（1）2000—2019年间，宁夏草地植被年均NDVI呈波动增加趋势，增速为0.005·a^{-1}，区域波动差异性较大；空间上呈现南高北低的分布特征，极高植被覆被和高植被覆被区域集中分布在固原市六盘山地区以及沿黄河灌溉地带；（2）20 a间植被覆被状况显著改善，总体变化趋势向好，但仍有59.341%的草地未来可能存在持续退化或由改善向退化转变的潜在风险；（3）草地植被分布响应最敏感的环境因子是降水，交互解释力整体最强的是气候与土壤；影响草地植被分布和变化特征的因子之间交互作用的主要表现形式为相互增强或非线性增强关系，因子之间不存在独立关系。

关键词：NDVI；趋势分析；时空变化；驱动力；草地；宁夏

草地是介于沙漠与森林生态系统中间以草地植被占主体的土地类型，为全球覆盖最广的植被类型之一，约占陆地生态系统总面积的1/4[1-3]。草地植被在保护物种多度、维持畜牧动态平衡、调节水文循环和气候变化等方面作用重大[4-5]。

归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index，NDVI)与地表植被叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）、净初级生产力（Net Primary Production，NPP）和光合有效辐射吸收系数（Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation，FAPAR）等密切相关，可用来准确快速评估地表植物长势或盖度[6-7]。气象、地表及人类活动因素对草地植被影响极其显著，干旱半干旱地区草地植被一旦遭到破坏便难以恢复[8-9]。因此，研究区域尺度的草地植被变化及其驱动因子对草地生态系统的保护修复具有重要意义。李鑫磊等[10]对影响河套灌区林草植被覆盖度因素进行分析后发现，区域含水量的大小是影响河套灌区林草地生长状况的主要驱动力；林妍敏等[11]发现，宁夏贺兰山植被覆盖度变化驱动因子主要是降水、土壤类型、植被类型和地区生产总值（GDP）；李梦华等[12]研究显示，气候是影响宁夏植被覆盖度的主导因素；付含培等[13]对黄河流域NDVI时空变化及驱动力进行分析得出20 a来黄河流域生态环境逐步改善，气候因素是影响NDVI空间分布的主导因素。

目前，宁夏植被覆被变化研究中的植被覆被包括林地、草地、湿地、耕地、园地和其他土地等地类，因草地较难分离出来，缺少只针对草地植被覆被时空动态变化及驱动力的研究。本研究采用年均值法、Theil-Sen Median倾斜度分析、Mann-Kendall检验方法及Hurst指数研究宁夏草地植被覆被时空分布及变化特征、可持续性特征和未来发展趋势，同时，

收稿日期：2023-01-27； **修订日期**：2023-03-17
基金项目：国家林业和草原局计划项目“黄河流域林草生态资源专题监测技术研究”（LC-2-02）
作者简介：文妙霞（1971-），女，高级工程师，主要从事林草资源调查和监测工作. E-mail: 1943203393@qq.com
通讯作者：胡云云. E-mail: 63970165@qq.com

应用地理探测器(The geographical detectors)揭示影响NDVI变化的驱动力。地理探测器是为了研究空间差异程度及其显著性检验和归因分析,广泛应用于医学、考古、土地利用、区域经济等各个领域各区域尺度[14],已有学者用其来揭示影响植被NDVI变化的驱动力[10-13]。鉴于此,本研究利用宁夏2000—2019年SPOT/VEGETATION NDVI时间序列数据,分析宁夏草地NDVI变化特征,并采用地理探测器进一步分析宁夏草地植被覆被变化驱动因子,为宁夏制定科学草地保护修复模式和治理措施,实现草地生态系统的可持续经营提供科学参考和决策依据,对于维持区域草地生态系统平衡,推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

1 研究区概况

宁夏位于我国西北地区(35°14′~39°23′N,104°17′~107°39′E)(图1),西面、北面、东面分别由腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地相围,南面与黄土高原相连。地势南高北低,地貌复杂,最高点为敖包疙瘩(俄博疙瘩、马蹄岭),海拔3556 m。全区属温带大陆性干旱、半干旱气候,有干旱少雨、蒸发强烈、风大沙多、南凉北暖和南湿北干等特点,年均温5~10 ℃,无霜期150 d左右,年降水量200~700 mm,是我国典型的生态脆弱区[15]。自然植被类型主要有草原、森林和灌丛等。宁夏草原随南北气候和水热条件的递变,形成了丰富多样的草地类型,由南向北依次划分为:山地草甸、温性草甸草原、温性典型草原、温性荒漠草原、温性荒漠、温性草原化荒漠。2021年宁夏林草资源监测结果显示,温性荒漠草原占草地总面积的62.113%,温性典型草原占25.193%,是宁夏草地植被面积占比最大的两个草地类型。草地作为宁夏生态系统的主体,发挥着防风固沙、保持水土等生态功能,对维持区域生态平衡、促进经济发展具有重要作用。

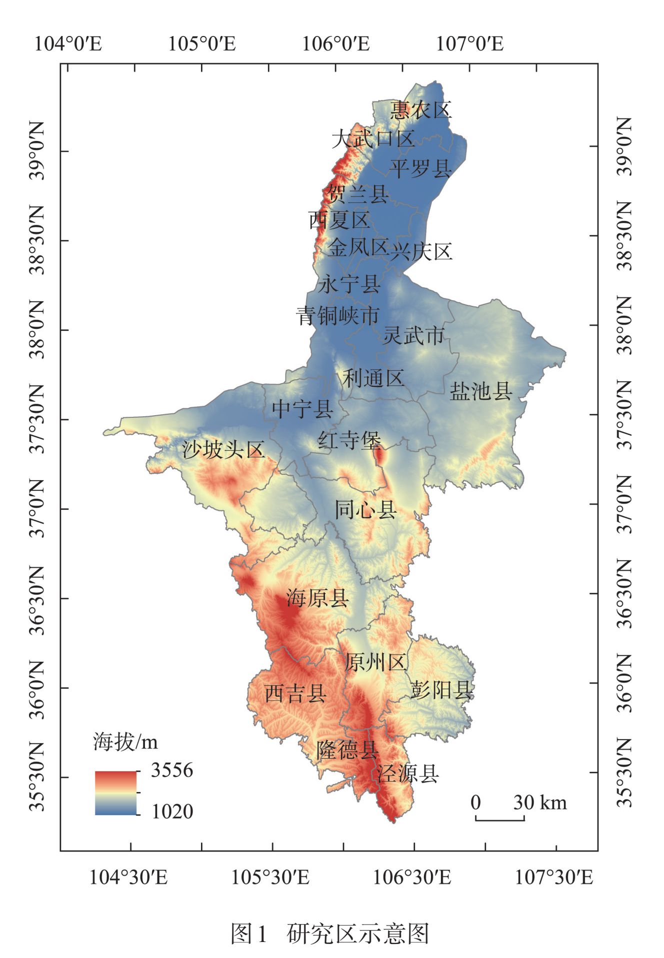


图1 研究区示意图

Fig. 1 Study area schematic

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

研究采用的数据来源及预处理方法如表1所示。在建立地理探测器模型时,需对各因子数据进行预处理,其中地貌、土壤数据根据一级类别(分别为地貌类型和土纲)进行离散化处理;其他因子均归一化处理。以NDVI为Y变量,13个因子数据为X变量进行探测。

2.2 研究方法

2.2.1 时间序列与空间格局分析 逐年计算2000—2019年宁夏草地NDVI年均值,分析20 a间NDVI变化规律;逐像元计算2000—2019年草地NDVI平均值,得出20 a NDVI平均值空间分布特点,分析其变化特征。

2.2.2 NDVI空间波动性分析 利用变异系数反映草地植被覆被变化的波动程度,计算公式[11]如下:

$$C_v = \frac{1}{\overline{\mathrm{NDVI}}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{NDVI}_i - \overline{\mathrm{NDVI}}\right)^2} \quad (1)$$

式中:C_v为变异系数。

2.2.3 Theil-Sen Median倾斜度分析及Mann-Kendall趋势检验 Theil-Sen Median倾斜度表示NDVI的变化率和变化趋势[16-17]。计算公式如下:

$$S = \mathrm{Median}\frac{\mathrm{NDVI}_j - \mathrm{NDVI}_i}{j-i}, 1 < i < j < n \quad (2)$$

对于NDVI时间序列{NDVI},$t = 1, 2, 3, \cdots, n$,定义斜率S。

表1 数据来源与处理

Tab. 1 Data source and data preprocessing

数据集	数据来源	空间分辨率	数据预处理
NDVI数据集	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)	1 km	–
中国气象背景数据集		500 m	–
中国1:1000000地貌类型空间分布数据		1 km	–
中国土壤类型空间分布数据		1 km	–
(数字高程模型)DEM		90 m	利用ArcGIS 10.8获取坡度和坡向数据,统一范围大小和空间分辨率
GDP密度	宁夏数据网站 (http://nxdata.com.cn/)	县域尺度	在ArcGIS 10.8中,插值到县域尺度
人口密度			
草地矢量数据	2021年宁夏林草资源数据库	–	按细化地类提取宁夏回族自治区范围内的草地图斑,融合生成草地范围矢量数据

式中:Median为中位数;$NDVI_j$和$NDVI_i$分别为第j、i时间序列的NDVI值;当斜率S>0时,NDVI时间序列{$NDVI_i$}呈增长趋势,反之,时间序列{$NDVI_i$}呈下降趋势。

Mann-Kendall检验(M-K检验)在评估水文及气候变化趋势中广泛应用,它考虑了数据的有效分布,且可以自动处理异常值,本研究用来判断像元尺度上NDVI变化趋势的显著性。

M-K检验方法计算公式参考Ali等[18]的研究。

2.2.4 NDVI未来演变趋势分析 基于Hurst指数法[19-20]对宁夏草地NDVI未来演变趋势进行预测,其计算公式如下:

$$\Delta NDVI_i = NDVI_i - NDVI_{i-1},\ i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (3)$$

$$\overline{\Delta NDVI_i} = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}\Delta NDVI_i,\ i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (4)$$

$$X(h) = \sum_{i=1}^{t}(\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI_t}),\ 1 \leqslant h \leqslant t \quad (5)$$

$$R(t) = \max X(h) - \min X(h),\ t = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (6)$$

$$S(t) = \left[\frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}(\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI_t})^2\right]^{\frac{1}{2}},\ t = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (7)$$

$$R(t)/S(t) = c \cdot t^H \quad (8)$$

式中:c为常数;t为时间;H为Hurst指数。当满足公式(8)时,说明NDVI具有长期记忆的时间序列,即存在Hurst现象(当0.5<H<1,未来变化趋势延续过去的变化)。

2.2.5 草地NDVI趋势变化驱动力分析 选取表2因子,利用地理探测器模型分析影响宁夏草地NDVI变化潜在驱动力。采用ArcGIS 10.8软件将影响因素与空间位置进行关联,分析NDVI变化情况。

表2 宁夏草地NDVI影响因素

Tab. 2 Influencing factors of grassland NDVI in Ningxia

气候因素	地表因素	人类活动因素
平均降水量(X_1)	海拔(X_7)	GDP(X_{12})
湿润指数(X_2)	土壤类型(X_8)	人口密度(X_{13})
干燥度(X_3)	地貌(X_9)	
年均温(X_4)	坡度(X_{10})	
≥0 ℃积温(X_5)	坡向(X_{11})	
≥10 ℃积温(X_6)		

(1) 分异及因子探测(q)

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (9)$$

式中:L为Y(NDVI)、X(影响因子)的分类;h=1, 2, …, L; σ_h^2为h层方差;σ^2为全区Y(NDVI)的方差;N_h为h层单元数目;N为Y(NDVI)单元数目。q的值域为[0,1],根据q值大小可以验证X对Y的解释性,解释性越高,则其值越接近1。

(2) 交互作用探测

交互作用类型及判断准则见表3。

表3 探测因子交互作用类型

Tab. 3 Interaction types of the detection factors

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1)+q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$

(3) 生态探测(F)

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1} - 1)SSW_{X2}} \quad (10)$$

$$SSW_{X1}=\sum_{h=1}^{L1}N_h\sigma_h^2 \tag{11}$$

$$SSW_{X2}=\sum_{h=1}^{L2}N_h\sigma_h^2 \tag{12}$$

式中:$L1$,$L2$分别为$X1$,$X2$分层的数量;N_{X1},N_{X2}分别为二者样本数目;SSW_{X1},SSW_{X2}分别为$X1$和$X2$形成的分层的层内方差之和。

(4)风险区探测

用于探测各类因子对植被覆被影响的类型或适宜范围,采用t统计量检验。具体公式如下:

$$t_{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}}=\frac{\bar{Y}_{h=1}-\bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}}+\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{13}$$

式中:$\bar{Y}_h$表示子区域h内的NDVI均值;n_h为子区域h内样本数量;Var表示方差。统计量t近似地服从Student's t分布,其中自由度的计算方法为:

$$df=\frac{\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}}+\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}}{\frac{1}{n_{h=1}-1}\left[\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}}\right]^2+\frac{1}{n_{h=2}-1}\left[\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}\right]^2} \tag{14}$$

零假设H_0:$\bar{Y}_{h=1}=\bar{Y}_{h=2}$,如果在置信水平$\alpha$下拒绝$H_0$,则认为两个子区域间NDVI均值存在着明显的差异。

3　结果与分析

3.1　草地NDVI时间序列变化特征

以年为时间尺度,分析宁夏草地NDVI均值变化情况。由图2可知,2000—2019年宁夏NDVI均值呈增加趋势,增速为$0.005\cdot a^{-1}$。2000年NDVI值最低,为0.162;2018年NDVI值最高,为0.301。宁夏2000—2005年NDVI均值为0.199,2005—2010年NDVI均值为0.214,2010—2015年NDVI均值为0.253,2015—2019年NDVI均值为0.271,草地植被覆被总体趋势向好发展。

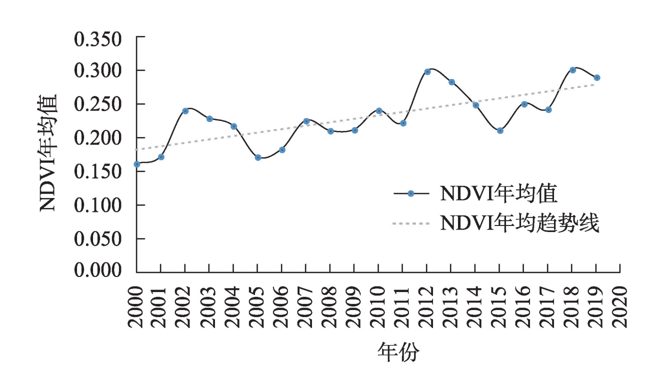


图2　2000—2019年宁夏草地NDVI年际变化

Fig. 2　Interannual variation of grassland NDVI in Ningxia from 2000 to 2019

3.2　草地NDVI空间分布格局

基于2000—2019年NDVI时间序列数据,逐像元计算20 a平均值,得到各像元NDVI平均值,结合宁夏实际情况,本研究利用自然间断点分级法(Jenks),将草地植被状况划分为5种类型:极低植被覆被(0<NDVI≤0.190)、低植被覆被(0.190<NDVI≤0.251)、中植被覆被(0.251<NDVI≤0.338)、高植被覆被(0.338<NDVI≤0.459)、极高植被覆被(NDVI>0.459)。宁夏NDVI空间分布总体表现为南高北低(图3)。其中,极低植被覆被区域面积为7071.725 km^2,占宁夏草地总面积的34.397%,主要分布于宁夏的西北部地区,地处腾格里沙漠边缘,包括惠农区、大武口、中宁县、青铜峡、沙坡头;低植被覆被区域面积为7845.092 km^2,占38.157%,多位

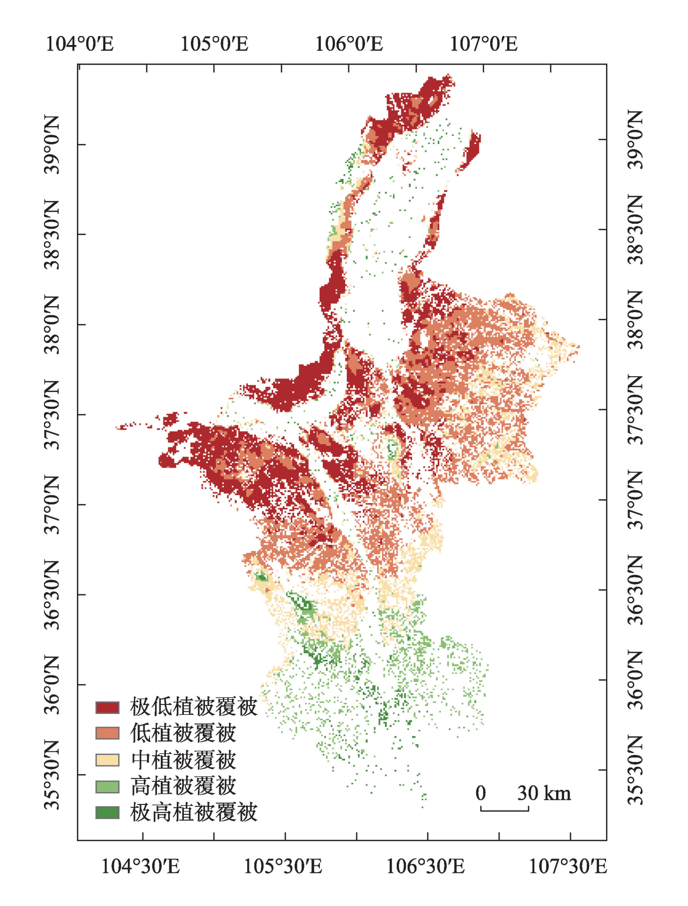


图3　2000—2019年草地植被覆被空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of grassland vegetation cover in Ningxia from 2000 to 2019

于中东部干旱少雨地区,包括灵武市、盐池县、利通区、平罗县、兴庆区、永宁县、同心县、红寺堡;中植被覆被区域面积为3355.033 km^2,占16.318%,集中分布在海原县、贺兰县;极高植被覆被区域面积为1688.375 km^2,占8.212%,高植被覆被面积为599.619 km^2,占2.916%,集中分布在固原市六盘山地区以及沿黄河灌溉地带。

3.3 草地NDVI空间波动性分析

逐像元计算2000—2019年宁夏草地NDVI变异系数(C_v),并参照自然间断法进行划分(图4)。极低波动(0.041 < C_v≤0.161),面积1731.813 km^2,占宁夏草地面积的8.423%;低波动(0.161 < C_v≤0.204),面积5501.385 km^2,占26.758%;中等波动(0.204 < C_v≤0.241),面积7538.200 km^2,占36.665%;高波动(0.241 < C_v≤0.289),面积4722.352 km^2,占22.969%;极高波动(C_v > 0.289),面积1066.094 km^2,占5.185%。20 a间,宁夏草地NDVI变化整体呈现低波动和中等波动变化态势,区域波动差异性较大。

3.4 草地植被时空格局演变

采用Theil-Sen Median倾斜度分析与M-K趋势

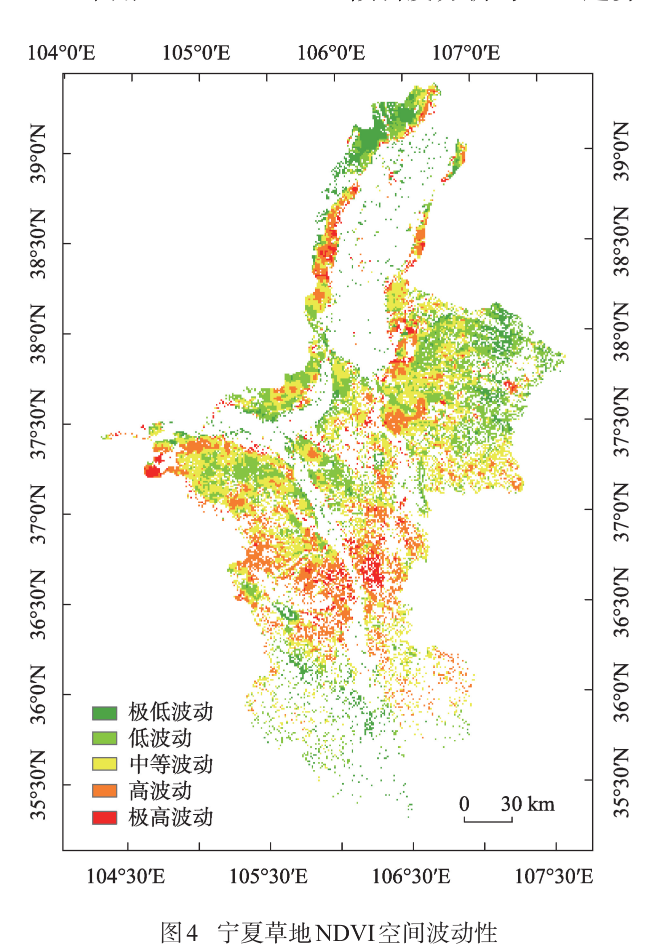


图4 宁夏草地NDVI空间波动性

Fig. 4 Spatial fluctuation of NDVI in Ningxia grassland

显著性检验相结合,开展草地NDVI变化趋势分析。根据Theil-Sen Median倾斜度分析结果,按S > 0、S=0和S < 0,将草地植被覆被变化分别划分为改善、基本不变和退化3种情况。根据M-K检验结果(0.05置信水平)将NDVI变化显著性分为5级。将Theil-Sen Median倾斜度分级结果与M-K检验分级结果进行空间叠加,将草地NDVI变化趋势划分为:显著改善、轻微改善、基本不变、轻微退化和显著退化5类[21]。由变化趋势结果可见,宁夏草地20 a间植被覆被状况明显改善,退化面积较小,总体变化趋势向好。其中,显著改善面积13734.576 km^2,占66.803%;轻微改善面积5116.118 km^2,占24.884%;基本不变面积84.041 km^2,占0.409%;轻微退化面积1575.062 km^2,占7.661%;显著退化面积50.047 km^2,占0.243%(图5)。

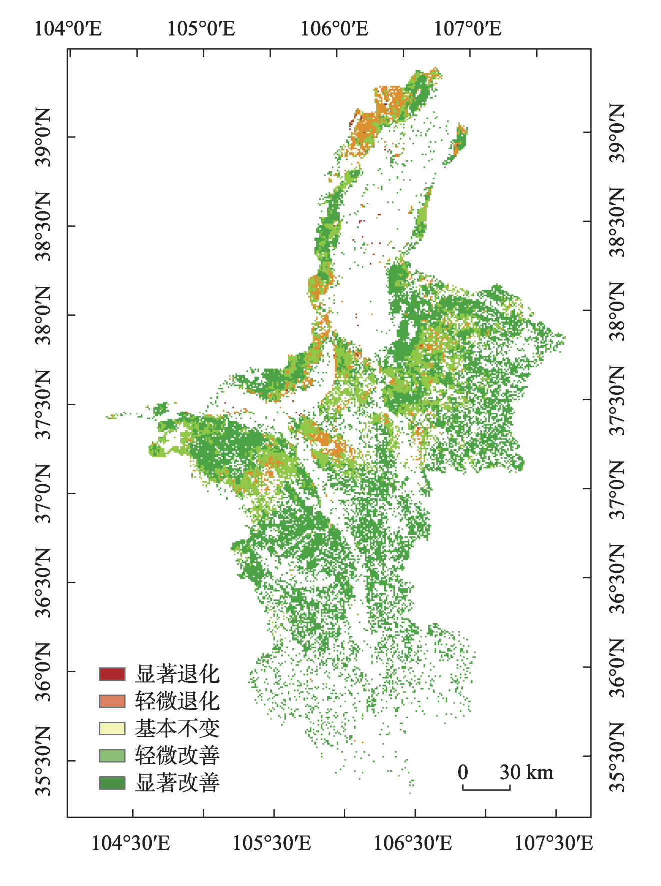


图5 2000—2019年宁夏草地植被覆被变化趋势

Fig. 5 Change trend of grass coverage in Ningxia from 2000 to 2019

为进一步分析宁夏草地演化过程,利用ArcGIS 10.8进行NDVI空间分析,得到2000—2019年宁夏草地植被覆被空间转移矩阵(表4),结果表明,2000—2019年期间,草地极低植被覆被大幅减少,

表4　宁夏草地植被覆被空间转移矩阵

Tab. 4　Spatial transfer matrix of grassland vegetation cover in Ningxia　　/%

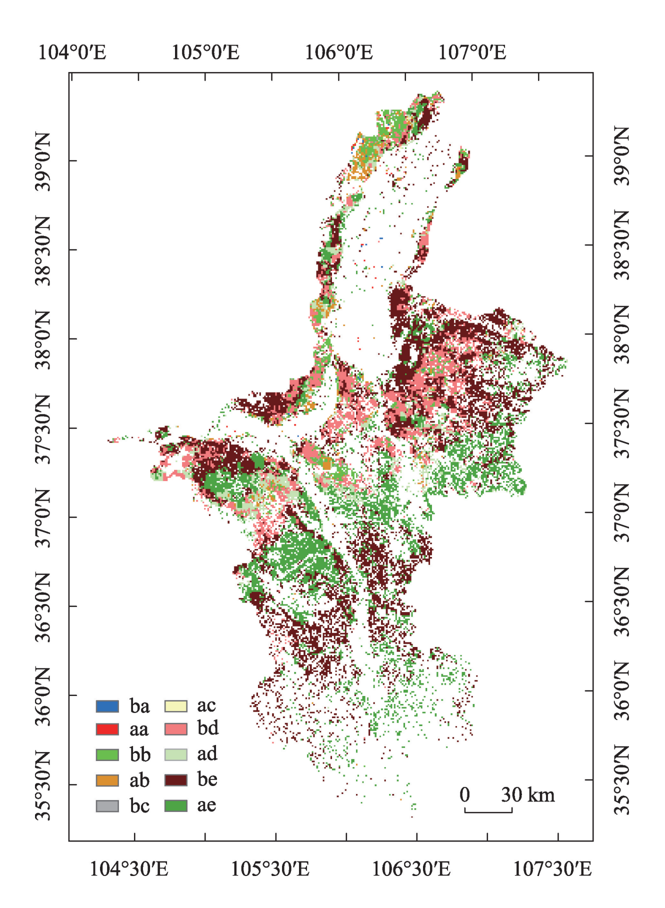
	植被类型	2000年					
		极低植被覆被	低植被覆被	中植被覆被	高植被覆被	极高植被覆被	合计
2019年	极低植被覆被	15.746	0.040	0.007	0.010		15.803
	低植被覆被	29.591	0.297	0.008			29.896
	中植被覆被	28.450	1.291	0.071		0.022	29.834
	高植被覆被	9.923	4.493	0.692	0.086	0.021	15.215
	极高植被覆被	0.304	3.093	3.477	1.735	0.643	9.252
合计		84.014	9.214	4.255	1.831	0.686	100.000

低一级植被覆被向高一级植被覆被转化明显。总体来看,宁夏草地植被增长明显,生态保护修复成效显著。

3.5　草地NDVI未来演化趋势

3.5.1　NDVI空间可持续性　经R/S分析,宁夏草地Hurst指数均值为0.488,说明全区草地植被覆被变化存在时间序列上反持续性。分类结果显示,$0.5<H<1$的区域面积合计8884.793 km^2,占全区草地总面积的43.214%,该区域植被覆被呈同向持续性特征,即植被覆被变化可能维持2000—2019年期间的变化趋势;$0<H<0.5$区域面积合计11675.051 km^2,占56.786%,植被覆被呈反向持续性特征,即植被覆被未来变化可能与2000—2019年期间的趋势相反。

3.5.2　NDVI未来发展趋势　将NDVI空间变化趋势和空间可持续性特征进行空间叠加分析(图6),根据分析结果将宁夏草地植被覆被未来发展趋势分为良性方向、恶性方向、稳定不变和不确定4个方向(表5)。未来草地植被覆被可能呈良性发展的区域面积占草地总面积的40.255%,主要分布在原州区、彭阳县、泾源县、隆德县、西吉县、盐池县东南部、同心县北部、海原县北部、中宁县南部、沙坡头区东南部和大武口区。未来草地植被覆被可能呈恶性发展的区域面积占草地总面积的59.341%,主要分布在兴庆区、惠农区、永宁县、同心县南部、海原县南部、沙坡头区北部、中宁县北部、利通区、红寺堡、盐池县西北部、灵武市;未来草地植被覆被发展方向稳定不变和不确定的区域合计面积占草地总面积的0.404%。



注:aa为持续性&显著退化;ab为持续性&轻微退化;ac为持续性&稳定不变;ad为持续性&轻微改善;ae为持续性&显著改善;ba为反持续性&显著退化;bb为反持续性&轻微退化;bc为反持续性&稳定不变;bd为反持续性&轻微改善;be为反持续性&显著改善。

图6　宁夏草地植被覆被未来发展趋势

Fig. 6　Future development trend of grass coverage in Ningxia

3.6　草地NDVI空间分布的影响因子

3.6.1　不同影响因子对NDVI空间分异的驱动力分析　采用地理探测器对NDVI的空间分异及变化趋势进行分析,因子探测结果见表6,不同因子对宁夏草地NDVI空间分布的解释能力也不同。其中,年平均降水量、湿润度、干燥度、年均温、积温(≥0 ℃)的解释力均超过60%,分别为80.0%、79.4%、77.0%、62.0%、61.5%,是主要影响因子;海拔的解释力为59.1%;土壤类型、地貌、坡度、坡向、积温(≥10 ℃)、人口、GDP对宁夏草地NDVI影响不显著,均无解释力。

表5　宁夏草地植被覆被未来发展方向面积占比

Tab. 5　Distribution of future development direction of grass coverage in Ningxia

发展方向	结果	面积/km²	占比/%
良性方向	持续性&轻微改善	1554.343	7.560
	持续性&显著改善	5694.847	27.699
	反持续性&轻微退化	1009.142	4.909
	反持续性&显著退化	17.953	0.087
恶性方向	持续性&轻微退化	565.989	2.753
	持续性&显著退化	32.126	0.161
	反持续性&轻微改善	3562.232	17.326
	反持续性&显著改善	8039.117	39.101
不确定	反持续性&不变	51.024	0.248
稳定	持续性&不变	33.071	0.156

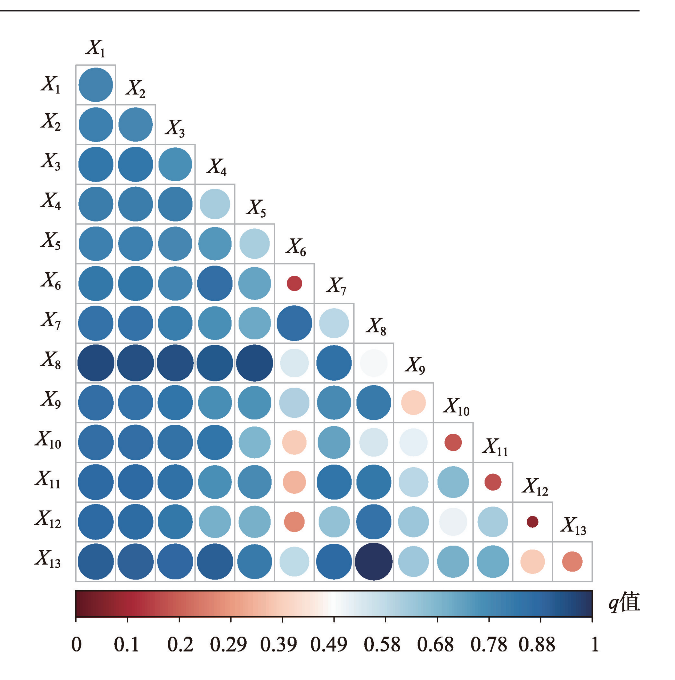
表6　因子探测结果

Tab. 6　Results of factor detector

因子	q值	P值
年平均降水量(X_1)	0.800	0.036
湿润度(X_2)	0.794	0.023
干燥度(X_3)	0.770	0.008
年均温(X_4)	0.620	0.020
≥0 ℃积温(X_5)	0.615	0.014
海拔(X_7)	0.591	0.031
土壤类型(X_8)	0.499	0.564
地貌(X_9)	0.392	0.870
人口密度(X_{13})	0.258	0.387
坡度(X_{10})	0.179	0.576
坡向(X_{11})	0.170	0.868
≥10 ℃积温(X_6)	0.137	0.880
GDP(X_{12})	0.071	0.908

3.6.2　交互作用探测分析　绝大多数因子交互呈现相互增强，表现为两因子的q值和大于单因子q值。通过因子探测结果可知，其中$X_8∩X_{13}$(0.975)>$X_1∩X_8$(0.937)>$X_5∩X_8$(0.935)>$X_2∩X_8$(0.930)>$X_3∩X_8$(0.928)交互作用影响力排名前五，土壤与以人口密度为代表的人类活动因子交互作用最强，但土壤与以降水、气温为代表的主导因子交互作用整体表现更为明显(图7)。虽然，人类活动的单因子解释力较低，但与环境因子的交互作用解释力较强，表明人类活动因素是影响植被覆被空间分异格局的间接因素。

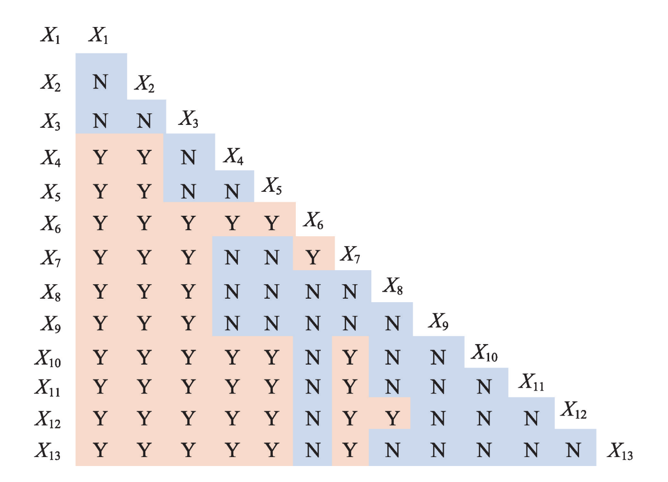
3.6.3　生态探测分析　由图8可知，大部分交互因子对NDVI空间分布有显著性差异，年平均降水量及湿润度与其他因子间更为突出。由此可见，NDVI受气候因素、地表因素及人类活动因素共同影响，



注：蓝色到红色渐变过程表示交互作用由强到弱。X_1为年平均降水量，X_2为湿润度，X_3为干燥度，X_4为年均温，X_5为≥0 ℃积温，X_6为≥10 ℃积温，X_7为海拔，X_8为土壤类型，X_9为地貌，X_{10}为坡度，X_{11}为坡向，X_{12}为GDP，X_{13}为人口密度。下同。

图7　交互作用探测影响力

Fig. 7　Interactive detection explanatory power of various factors



注：置信水平为95%，Y表示两因子对NDVI空间分布有显著差异，N则相反。

图8　生态探测结果

Fig. 8　Ecological detection results

气候因素为主导。

3.6.4　风险探测分析　基于风险探测，可以得出区域草地NDVI值最高时的各类影响因子的范围(表7)。气候因素：年平均降水量545~623 mm，年均温2.8~3.7 ℃，表明降雨量大、气温低的地区草地植被

表7　不同影响因子的适宜类型或范围

Tab. 7　Suitable ranges or types of detection indicators

因子	草地NDVI适宜类型或范围	NDVI均值
年平均降水量	545~623 mm	0.596
湿润度	80~200	0.596
干燥度	0~62	0.542
年均温	2.8~3.7 ℃	0.472
≥0 ℃积温	2165~2416 ℃	0.472
≥10 ℃积温	1905~2087 ℃	0.402
海拔	2303~2502 m	0.436
土壤类型	半水成土	0.403
地貌	中起伏山脉	0.596
坡度	24.73°~28.73°	0.365
坡向	349.69°~0.84°	0.385
GDP	5×10^4~6×10^4元·km^{-2}	0.475
人口密度	62~72人·km^{-2}	0.587

覆被状况更好。地表因素：高程2303~2502 m，坡度24°~28°，土壤类型为半水成土，地貌为中起伏山脉时草地植被覆被状况最好，说明在高山地区草地植被生长状况更好。人类活动因素：GDP（5×10^4~6×10^4元·km^{-2}）、人口密度（62~72人·km^{-2}）时草地植被覆被状况更好，说明受人为干扰小的地区草地植被覆被状况最好。

4　讨 论

4.1　宁夏草地NDVI时空变化特征

宁夏位于中国西北部，地处黄河中上游地区及腾格里沙漠、黄土高原和蒙古高原的交界地带，地形复杂，气象、地表和人类活动等因素共同影响区域内草地植被覆被的变化。从时间上看，2000—2019年宁夏草地年平均NDVI值呈增加趋势，增速为0.005·a^{-1}，宁夏2000—2019年NDVI值由0.162上升至0.290。21世纪初，国家对黄土高原实施了退耕还林(草)工程等一系列生态环境治理措施，有效促进了植被生长和恢复。宁夏在此期间全域坚持天然草原禁牧封育措施，植被生长良好，草原植被群落趋于稳定[22-23]，草原生态得到明显恢复。从空间上看，宁夏草地NDVI分布总体表现为：南高北低，与纬度负相关，空间分异特征明显。王文晓等[24]研究中也发现，宁夏草原物种丰富度由南到北呈递减趋势。这与区域的气温与降水等有着密切关系，宁夏具有南寒北暖、南湿北干特点，气温大体呈北高南低分布，降水量由南向北递减，而高气温低湿度的气候则不利于植被的生长[25]。

20 a间，宁夏草地NDVI空间分布变化整体呈现低波动和中等波动变化态势，区域波动差异性较大。低波动和极低波动区域主要分布于南部山区降水相对充沛区域和黄河沿岸灌溉便利地区；中高波动区域主要分布于中部干旱带、荒漠地区以及北部贺兰山地区等，这与宁夏降水量年度波动情况密切相关。

目前，宁夏草地显著退化面积仅占草地面积的0.243%，但根据未来发展趋势分析结果仍有59.341%的草地未来可能存在持续退化或由改善向退化转变的潜在风险。林妍敏等[11]研究发现，宁夏贺兰山地区仍有30.7%的植被存在退化的潜在风险。草地植被覆被对气候变化的响应较敏感，气候条件是影响该区域草地植被生长的主要因素[22]，也有学者指出干旱半干旱区域，植被生长受气候因素限制，暖湿化有利于植被生长[26]。草原植被恢复主要受气象条件和生态保护政策双重因素的影响，未来应加强草原保护修复工程建设的长期性和连续性，建议继续推行禁牧及退耕还林还草政策，建立健全草地保护利用相关法规体系，深化牧区改革，优化畜种畜群结构，控制草地载畜量。草原管理部门要加大草地管理力度，进一步加强对农牧民的宣传教育，杜绝乱占、乱垦、乱牧等现象。同时，要完善降水、气温等气候条件的动态变化监测工作，及时掌握气候变化对草原植被生长的影响，为草地保护和培育决策提供科学支撑。

4.2　驱动因子对草地NDVI空间分布的响应

草地生态系统对气候因素变化响应尤为显著，尤其是在半干旱地区，气候是对草地植被生长具有决定性影响的自然驱动力[27-28]。本研究分析了草地NDVI与气象、地表、人类活动因素之间的关系，结果表明，年平均降水量、湿润度、干燥度、年均温、积温(≥0 ℃)的解释力均超过60%，其中年平均降水量与湿润度的解释力均接近80%。由此可见，降水是宁夏草地植被覆被空间分异的主要驱动力，这与李梦华等[12]研究结果一致。本研究得出土壤与气象因素中的降水、气温交互作用表现更为明显，原因是宁夏土壤有机质自南向北呈降低趋势，南壤北沙分布格局明显[29]。风险探测分析结果显示，土壤类型为半水成土区域草地植被覆被最好。半水成土是指在气候比较湿润的森林草原条件下发育而

成的土壤,包括草甸土、黑土、潮土、白浆土、灌淤土等[30],相比干旱土更适宜植被生长。刘宪锋等[31]指出,在干旱半干旱地区,土壤类型作为植被生长和空间分布的重要生态因子,对植被生长和雨水再利用效率的影响显著。

本研究采用地理探测器对宁夏草地NDVI空间分异特征进行分析,结论与同区域研究结果基本一致[12,24]。利用地理探测器探究驱动因子优势明显,可以从空间上定量研究各数值型与定性数据驱动因子对研究区草地NDVI演变的影响,但人类活动对于草地植被覆被的影响十分复杂,特别是管理模式、家畜结构与密度、放牧强度等均会对草地植被生长造成一定影响。同时,草原火灾、鼠虫灾害等难以量化的因子也会对草地植被覆被造成影响,以上因素本研究尚未考虑。建议今后研究中可以选取其他影响草地植被覆被的相关因子,深入探究植被覆被状况变化的驱动机制。

5 结 论

本研究利用2000—2019年SPOT/VEGETATION NDVI数据、气象数据等,采用年均值法、Theil-Sen Median倾斜度分析、Mann-Kendall检验方法和地理探测器模型,分析了宁夏草地植被覆被时空变化特征及其影响因子的驱动作用。结论如下:

(1) 20 a间,宁夏草地植被覆被呈现波动上升趋势,植被覆被状况整体呈现明显改善的趋势;宁夏草地植被覆被在空间分布上总体呈现南高北低的特征,高覆被区集中在固原市六盘山地区以及沿黄河灌溉地带;空间分布变化整体以中等波动和低波动变化态势为主,区域波动差异性较大。

(2) 宁夏草地植被覆被在2000—2019年间虽明显改善,但预测未来发展趋势持续性较差,仍有59.341%的草地未来可能存在持续退化或由改善向退化转变的潜在风险。

(3) 宁夏草地植被覆被的空间分布受气象、地表和人类活动等因素共同作用,气象因素影响作用大于地表与人类活动因素,年平均降水量对植被覆被空间分布的影响最大。

(4) 影响草地植被分布和变化特征的因子之间交互作用的主要表现形式为相互增强或非线性增强关系,因子之间不存在独立关系,交互解释力最强的是气候与土壤。

参考文献(References):

[1] Gibson D J. Grasses and Grassland Ecology[M]. New York: Oxford University Press, 2009:1-320.

[2] Dixon A P, Faber-Langendoen D, Josse C, et al. Distribution mapping of world grassland types[J]. Journal of Biogeography, 2014, 41 (11): 2003-2019.

[3] Conant R T. Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems[J]. Integrated Crop Management, 2010, 9: 3-5.

[4] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等.中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110. [Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Jia Liangqing, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1101-1110.]

[5] 郭艳菊, 马晓静, 许爱云, 等. 宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1571-1581. [Guo Yanju, Ma Xiaojing, Xu Aiyun, et al. Spatial characteristics of soil moisture and vegetation in desertification grassland in eastern Ningxia sand- wind area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1571-1581.]

[6] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241-252.

[7] Zhao L, Dai A, Dong B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982-2013[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 198-209.

[8] 李茂林, 闫庆武, 仲晓雅, 等.干旱半干旱地区植被覆盖度变化及主导因素分析: 以锡林郭勒为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1548-1558. [Li Maolin, Yan Qingwu, Zhong Xiaoya, et al. Analysis on evolution and dominant factors of factional vegetation coverage in arid and semi-arid regions: A case of Xilingol [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(12): 1548-1558.]

[9] 张起鹏, 王建, 张志刚, 等. 高寒草甸草原景观格局动态演变及其驱动机制[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6510-6521. [Zhang Qipeng, Wang Jian, Zhang Zhigang, et al. Dynamic change of landscape patterns and its driving mechanism in the Qinghai-Tibetan alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6510-6521.]

[10] 李鑫磊, 李瑞平, 王秀青, 等. 基于地理探测器的河套灌区林草植被覆盖度时空变化与驱动力分析[J].干旱区研究, 2023, 40 (4): 623-635. [Li Xinlei, Li Ruiping, Wang Xiuqing, et al. Spatiotemporal change and analysis of factors driving forest-grass vegetation coverage in Hetao Irrigation District based on geographical detector[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 623-635.]

[11] 林妍敏, 李文慧, 南雄雄, 等. 基于地理探测器的宁夏贺兰山植被覆盖度时空分异及驱动因子[J]. 应用生态学报, 2022, 33

(12): 3321-3327. [Lin Yanmin, Li Wenhui, Nan Xingxiong, et al. Spatial-temporal differentiation and driving factors of vegetation coverage in Ningxia Helan Mountain based on geodetector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3321-3327.]

[12] 李梦华, 韩颖娟, 赵慧, 等. 基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1317-1325. [Li Menghua, Han Yingjuan, Zhao Hui, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1317-1325.]

[13] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2022, 28(2): 146-162. [Fu Hanpei, Wang Ranghu, Wang Xiaojun. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the Yellow River Basin during1999-2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 28(2): 146-162.]

[14] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jingfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[15] 《中国地图集》编辑部. 中国地图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 250-253. [Editorial Board of Atlas of China. Atlas of China [M]. Beijing: Geology Press, 2010: 250-253.]

[16] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II and III[J]. Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 1950, 53: 386-392.

[17] Sen K P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[18] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze river using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method[J]. Water, 2019, 11: 1855.

[19] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 770-799.

[20] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818-828. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Liu Mingchun, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818-828.]

[21] 郝家田, 胡云云, 杜一尘, 等. 基于NDVI的2009—2018年黄河流域林草植被覆盖变化[J]. 林业科学, 2022, 58(3): 10-19. [Hao Jiatian, Hu Yunyun, Du Yichen, et al. NDVI-based coverage changes of forest and grass vegetation in Yellow River Basin during 2009 to 2018[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(3): 10-19.]

[22] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 等. 近30 a气候变暖对宁夏植被的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2095-2106. [Du Lingtong, Song Naiping, Wang Lei, et al. Impact of global warming on vegetation activity in Ningxia Province from 1982 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2095-2106.]

[23] 裴志方, 杨武年, 吴彬, 等. 2000—2016年宁夏植被覆盖景观格局遥感动态分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 215-219. [Pei Zhifang, Yang Wunian, Wu Bin, et al. Analysis of dynamic vegetation cover landscape pattern in Ningxia Hui Autonomous Region from 2000 to 2016 using remote sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 215-219.]

[24] 王文晓, 黄文广, 杨君珑, 等. 宁夏草原物种丰富度分布格局及其水热解释[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 158-163. [Wang Wenxiao, Huang Wenguang, Yang Junlong, et al. Distribution patterns and climate explanation of plant species richness in Ningxia grasslands[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(5): 158-163.]

[25] 查同刚, 孙向阳, 于卫平, 等.宁夏段黄河护岸林体系结构的研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(3): 93-96. [Zha Tonggang, Sun Xiangyang, Yu Weiping, et al. Search on the construction of the Yellow River protection forest system in Ningxia Autonomous Region[J] Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(3): 93-96.]

[26] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967-979. [Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967-979.]

[27] 李玉武, 徐友宁, 张江华. 宁夏"三区两线"露天矿山复绿对策[J]. 宁夏工程技术, 2015, 14(4): 380-383. [Li Yuwu, Xu Youning, Zhang Jianghua. Countermeasures on vegetation restoration for opencast of Three Districts and Two Lines in Ningxia[J]. Ningxia Engineering Technology, 2015, 14(4): 380-383.]

[28] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4099-4107. [Qin Gexia, Wu Jing, Li Chunbin, et al. Grassland vegetation phenology change and its response to climate changes in North China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4099-4107.]

[29] 王吉智. 宁夏土壤[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1990: 49. [Wang Jizhi. Ningxia Soil[M]. Yinchuan: Ningxia people's Publishing House, 1990: 49.]

[30] 王贵贤. 国土工作手册[M]. 济南: 山东人民出版社, 1988: 281. [Wang Guixian. Homeland Work Manual[M]. Jinan: Shandong people's Publishing House, 1988: 281.]

[31] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982-2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5331-5342.]

Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors

WEN Miaoxia, HE Xuegao, LIU Huan, ZHANG Jing, LUO Chen, JIA Fengming, WANG Yigui, HU Yunyun

(Northwest Surveying and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: This study aims to examine the spatiotemporal variation characteristics of grassland vegetation cover at the regional scale and analyze its driving factors. The findings will provide a scientific reference and decision-making basis for the scientific formulation of protection and restoration models, treatment measures, and the sustainable management of the grassland ecosystem in Ningxia, which are crucial for maintaining the balance of the regional grassland ecosystem and promoting ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. In this study, the NDVI time series dataset of SPOT/VEGETATION (2000−2019) was used as the data source. The annual mean method, Theil-Sen Median trend analysis, and Mann-Kendall test were employed to study the spatiotemporal distribution and variation characteristics of grassland vegetation cover in Ningxia. Furthermore, the Hurst index method was used to analyze the sustainability characteristics and future development trends of grassland vegetation cover. Simultaneously, the influence of 13 factors, such as average precipitation, altitude, and gross domestic product, on the spatiotemporal distribution was quantified based on the geographical detectors approach. The results show that from 2000 to 2019, the average annual NDVI of vegetation in Ningxia grassland showed a fluctuating growth trend, with a growth rate of 0.005 per year. The regional fluctuation was quite different, with extremely high and high vegetation cover areas concentrated in the Liupan Mountains and the irrigation area along the Yellow River. Overall, the NDVI change showed a low to medium fluctuation trend, and the regional fluctuation was quite different. The vegetation cover condition improved significantly over the 20-year period, with a small degradation area and a favorable overall change trend. However, 59.341% of the grasslands are projected to face potential risks of continuous degradation or transformation from improvement to degradation in the future. The most sensitive environmental factor influencing grassland vegetation distribution response was precipitation, and climate and soil had the strongest interaction explanatory power overall. The relationship between the factors affecting the distribution and variation characteristics of grassland vegetation primarily manifested as mutual reinforcement or nonlinear enhancement, with no independent relationship between the factors. This study provides a scientific reference and decision-making basis for the sustainable management of the grassland ecosystem in Ningxia.

Keywords: NDVI; trend analysis; spatiotemporal variation; driving factor; grassland; Ningxia